

文章编号 1004-924X(2015)07-1972-06

空间滤波转速遥测中的旋转中心辨识

曾祥楷, 朱志雄*, 陈 阳, 刘全顺
(重庆理工大学 光电信息学院, 重庆 400054)

摘要: 进行空间滤波转速遥测时, 需要确定目标旋转中心所在的位置后才能判定转速的方向并计算转速的大小。本文根据光学空间滤波测速原理, 提出了一种基于双差分空间滤波传感器的旋转中心判定法。用多个光电池构成含有两个差分空间滤波器的双差分空间滤波传感器, 该传感器输出中心频率为 f_1 和 f_2 的两路准正弦信号; 移动双差分空间滤波传感器, 用移动前后的两组中心频率值计算出系数 j ; 根据 j 的符号和 f_1 与 f_2 的相对大小即可判定旋转中心的位置区域。结果表明, $j < 0$ 代表旋转中心的成像点 O' 在双差分空间滤波传感器的中间, $j > 0$ 且 $f_1 > f_2$ 表示 O' 在双差分空间滤波器的下同侧, $j > 0$ 且 $f_1 < f_2$ 表示 O' 在双差分空间滤波器的上同侧。该方法在转速相对平稳时能简单准确、远距离地辨识固体物旋转中心和气固液多相流涡旋中心的位置区域。

关键词: 差分空间滤波器; 双差分空间滤波传感器; 旋转中心; 位置辨识; 转速遥测

中图分类号: TH824; TP212.17 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152307.1972

Identification of rotational center in remote angular-velocity measurement with spatial filtering

ZENG Xiang-kai, ZHU Zhi-xiong*, CHEN Yang, LIU Quan-shun

(School of Optoelectronic Information, Chongqing University
of Technology, Chongqing 400054, China)

* Corresponding author, E-mail: 746274090@qq.com

Abstract: To determine the direction of a rotational speed and to calculate the value of the rotational speed in remote angular-velocity measurement with the spatial filtering technique, it is necessary to exactly identify the location zone of measured-object rotation center. Therefore, a method of determining the rotation center based on Double Differential Spatial Filtering Sensor (DDSFS) was proposed according to the principle of spatial filtering velocimetry. The DDSFS constructed by multiple photovoltaic cells consists of two Differential Spatial Filters (DSFs), which outputted two quasi-sinusoidal signals with the central frequencies of f_1 and f_2 . By moving the DDSFS, a coefficient j could be calculated by using two groups of central frequencies before and after moving the DDSFS. Then, the location zone of the rotational center could be distinguished depending on the sign of the coefficient j and the relative relation between f_1 and f_2 . The achieved results show that $j < 0$ represents the location zone of the imaged rotation center O' to be between DSF_1 and DSF_2 , and that $j > 0$ with $f_1 > f_2$ indicates the location zone of the imaged rotation center O' to be below the DDSFS, and that $j > 0$ with

收稿日期: 2015-01-28; 修订日期: 2015-03-30.

基金项目: 重庆理工大学研究生创新基金资助项目 (No. YCX2014220); 重庆市时栅传感及先进检测技术重点实验室科研基金资助项目 (No. 2013TGS006)

$f_1 < f_2$ indicates O' to be above the DDSFS. The proposed method can be employed to determine the rotational center of solid body, and the location of whirling center in multiphase fluid with solid, liquid or gaseous substances when the rotation speed is relative stable.

Key words: differential spatial filter; double differential spatial filtering sensor; rotation center; location identification; remote angular measurement

1 序 言

空间滤波测速法(Spatial Filtering Velocimetry, SFV)用运动的随机分布图像经空间滤波后的时域频率与空域频率间的关系来测量运动速度^[1-2]。该方法具有简单稳定、非接触或遥测性、环境适应性强、使用方便等优点,已广泛用于汽车、气液固多相流、微粒(含粉尘)等的线位移速度检测^[3-5]。不过,该方法很少用于旋转速度的传感测量,这是因为该方法中的信号频率由空间滤波器排列方向的线速度决定^[6],虽用线速度和旋转半径可测出转速,但在非接触或远距离的转速测量中^[7-9],尤其在流体或多相流的涡旋速度测量中^[10],旋转中心和半径都是变化的,所以难以精确测量。但是,在风机叶片、螺旋桨及其他大型旋转机械的监测、转速测量以及涡流测速中,都特别需要非接触或远距离地测量转速参数。因此,利用该项技术进行远距离转速测量的相关研究很受关注。

转速是矢量,包含量值和旋转方向,而空间滤波后的信号具有一定的随机性,其频率不携带速度方向信息^[11],因此用空间滤波器遥测转速时,需要避免测量旋转半径,并要远距离地判定旋转方向。本课题组采用多个光电池构成了两个平行排列的差分空间滤波器(Differential Spatial Filter, DSF),从而形成双差分空间滤波传感器(Double Differential Spatial Filtering Sensor, DDSFS)。该传感器兼有空间滤波和光电转换的功能,可用于物体转速量值和旋转方向的传感和遥测。进行转速遥测时,旋转的随机分布图像成像到传感器上,传感器输出两路准正弦信号;获取该两准正弦信号的中心频率 f_1 和 f_2 后,由公式 $\omega = |f_1 \pm f_2| p/L$ 计算转速 ω (式中, p 是 DSF 的栅距, L 是两个 DSF 间的距离)。在计算 ω 时,若旋转中心的像点在两差分空间滤波器之间,则符号取“+”,否则取“-”。旋转中心的位置决定了

转速 ω 的计算方法。同时,用 DDSFS 遥测转速时,旋转方向是通过 DSF 上的线速度方向以及旋转中心的位置来辨识的。因此,在空间滤波转速遥测中,只有在确定了旋转中心所在的位置后,才能判定转速的方向和大小。旋转中心的准确辨识在基于 DDSFS 的转速遥测中是至关重要的。文中阐述了 DDSFS 和基于 DDSFS 的转速遥测原理,提出了空间滤波转速遥测中的旋转中心辨识方法,并通过实验验证了该辨识方法的正确性。

2 双差分空间滤波传感器及转速计算

用光电池线阵组成的单个 DSF 可以测量运动物体的线速度,其测量光学系统如图 1 所示。光源照射运动物体后的反射图像经光学系统成像到 DSF 上,DSF 输出一路准正弦信号 I_0 ; 获取 I_0 的中心频率 f_0 后,可计算出被测物体的线速度 v_0 为^[12]:

$$v_0 = \frac{p}{M} f_0, \quad (1)$$

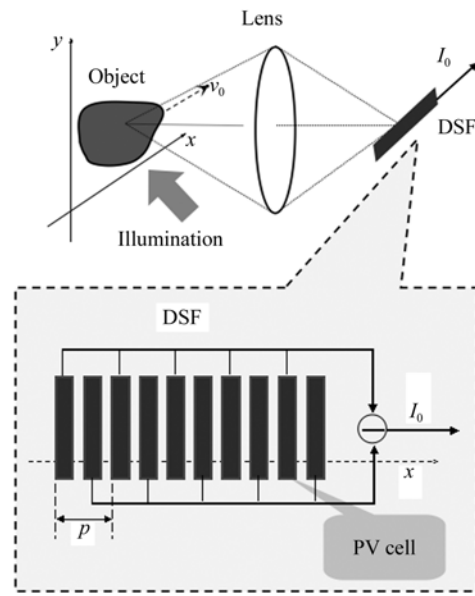


图 1 基于光电池线阵的空间滤波测速的光学系统
Fig. 1 Optical system of SFV with photovoltaic (PV) cell arrays

式中： M 是光学系统的放大倍数。

本文用多个光电池构成 DSF_1 和 DSF_2 ， DSF_1 和 DSF_2 同时兼有空间滤波和光电转换的功能， DSF_1 和 DSF_2 相距 L 且平行排列，从而构成了 DDSFS，如图 2 所示。

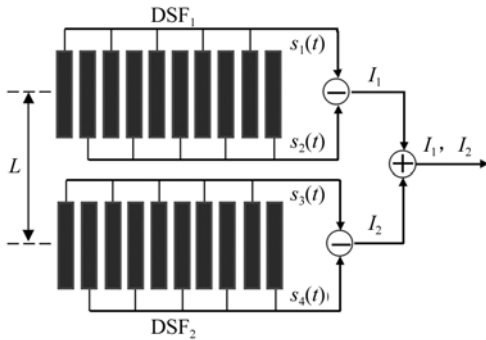


图 2 双差分空间滤波传感器的结构
Fig. 2 Structure of DDSFS

每个 DSF 由两个结构完全相同的梳状空间滤波器(Comb-like Spatial Filter, CSF)错位半个栅距构成，两个 CSF 的输出信号之差是 DSF 的输出信号。当旋转体上的随机分布图像成像到 DDSFS 上时，4 个 CSF 输出的时域信号分别为 $s_1(t)$ 、 $s_2(t)$ 、 $s_3(t)$ 和 $s_4(t)$ 。 $s_1(t)$ 与 $s_2(t)$ 相减得到 DSF_1 的输出信号 I_1 ， $s_3(t)$ 与 $s_4(t)$ 相减得到 DSF_2 的输出信号 I_2 。 I_1 和 I_2 是无直流分量的准正弦信号^[13]，其中心频率分别为 f_1 和 f_2 ， f_1 和 f_2 分别由 DSF_1 和 DSF_2 处图像的线速度决定。

用 DDSFS 遥测转速的装置如图 3 所示，主要由光学成像系统、DDSFS、信号预处理和波形变换、数据采集与处理子系统等部分组成。其遥测原理是：转速为 ω 的旋转被测体表面经光学系统成像到 DDSFS(含 DSF_1 和 DSF_2) 上， DSF_1 和 DSF_2 分别输出准正弦信号 I_1 和 I_2 ；经预处理和波形变换后的 I_1 及 I_2 传送到数据采集与处理子系统，用高频脉冲插补法或快速傅里叶变换法得到 I_1 和 I_2 的中心频率分别为 f_1 和 f_2 ，用 f_1 和 f_2 计算出被测体的转速 ω 。

设旋转中心的像点 O' 到 DSF_1 和 DSF_2 中心线的距离分别为 R_1 和 R_2 ，转速为 ω 的运动图像在 DSF_1 和 DSF_2 处的线速度分别为 ωR_1 和 ωR_2 (R_1 和 R_2 是像空间图像的旋转半径，该线速度表达式已包含了光学放大倍数 M)。根据空间滤波线速度测量法^[14-15]，转速 ω 与信号中心频率 f_1 、

f_2 的关系为：

$$\left. \begin{aligned} \omega R_1 &= p f_1 \\ \omega R_2 &= p f_2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

当旋转中心的像点 O' 在 DSF_1 和 DSF_2 之间时， $R_1 + R_2 = L$ ，则由式 (2) 可得转速 $\omega = (f_1 + f_2) p / L$ 。当 O' 在 DSF_1 和 DSF_2 的同侧区域时， $|R_1 - R_2| = L$ ，则由式 (2) 可得 $\omega = (f_1 - f_2) p / L$ ，这里 $\omega > 0$ 和 $\omega < 0$ 分别表示 O' 在 DSF_1 和 DSF_2 的下同侧和上同侧， p 和 L 是传感器的结构常数。由此表明，转速测量的误差源很少，且与安装误差和偏心无关。

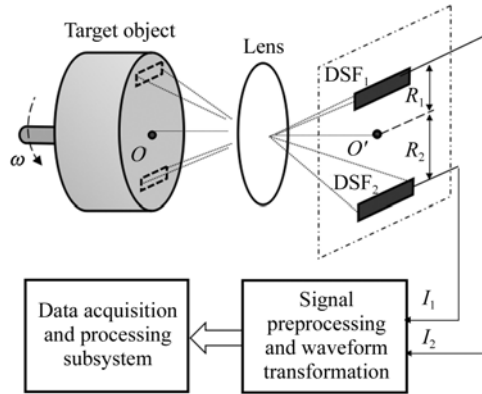


图 3 基于双差分空间滤波传感器的转速遥测系统
Fig. 3 Schematic diagram of remote angular-velocity measurement system based on DDSFS

3 旋转中心成像点的定位方法

从上述遥测转速的计算式可知，旋转中心成像点 O' 在传感器上的位置区域直接影响转速值的计算，而 O' 的位置区域有三种情况：一是 O' 在 DSF_1 和 DSF_2 之间(如图 4(a) 所示)，二是 O' 在 DSF_1 和 DSF_2 的下同侧(如图 4(b) 所示)，三是 O' 在 DSF_1 和 DSF_2 的上同侧(如图 4(c) 所示)。

在旋转机械及其系统中，一旦测试系统装调完毕，旋转中心成像点与 DDSFS 的相对位置关系是比较确定的，不会有很大的变动。用 DDSFS 输出信号的中心频率及其变化可确定旋转中心像点 O' 所在的位置区域，其具体过程是：在被测体的转速相对平稳时，先从 DDSFS 输出的准正弦信号 I_1 和 I_2 分别得到两个中心频率 f_1 和 f_2 ，比较 f_1 和 f_2 的大小；再将 DDSFS 沿径向平移 Δ ，

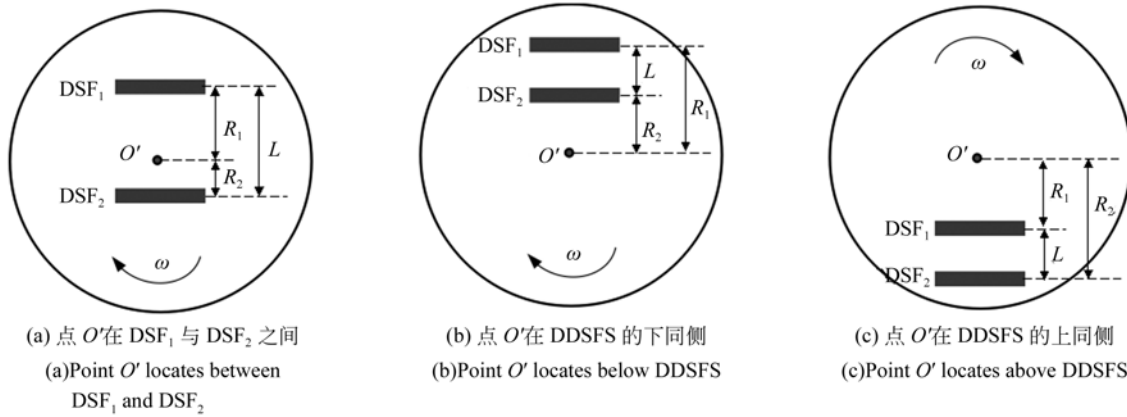


图 4 旋转中心成像点在 DDSFS 上的位置关系

Fig. 4 Locations of imaged rotation center on DDSFS

要求 $0 < \Delta < \min(R_1, R_2)$, 以保证平移后的 O' 点不偏离原区域; 从平移后的 DDSFS 输出信号中获取与 f_1, f_2 对应的中心频率 f_1', f_2' , 得到 DDSFS 平移前后的中心频率计算系数为:

$$j = \frac{f_1 - f_1'}{f_2 - f_2'} \quad (3)$$

根据 j 值的符号、 f_1 与 f_2 的相对大小可判定旋转中心像点的位置区域。定义 $R_x = \max(R_1, R_2)$, δ_ω / ω' 为被测体转速的相对变化量, 其中 $\delta_\omega = |\omega - \omega'|$, ω 和 ω' 分别是 DDSFS 平移前后的被测体转速。当 O' 点在 DSF_1 和 DSF_2 之间时, $R_1 + R_2 = L$; 当 O' 点在 DSF_1 和 DSF_2 的上同侧或下同侧时, $|R_1 - R_2| = L$ 。根据式(2)可得 DDSFS 平移 D 后的转速 ω' 与中心频率 f_1', f_2' 的关系为:

$$\begin{cases} \omega'(R_1 + \Delta) = pf_1' \\ \omega'(R_2 \pm \Delta) = pf_2' \end{cases} \quad (4)$$

由式(2)、(3)和(4)可得:

$$j = \pm 1 + \frac{\delta_\omega \cdot L}{\delta_\omega \cdot R_x \mp \omega \cdot \Delta} \quad (5)$$

在转速平稳时, $\delta_\omega = 0$, 则 $j = \pm 1$ 。在式(4)和式(5)中, 若 O' 点在 DSF_1 和 DSF_2 之间, 则符号取“ $-$ ”, 否则取“ $+$ ”。

由式(5)可知, 当 O' 点在 DSF_1 和 DSF_2 之间时, 若转速平稳 ($\omega = \omega', \delta_\omega = 0$), 则 $j = -1 < 0$; 若转速不平稳 ($\omega \neq \omega'$) 且 $\delta_\omega R_x < \omega' \Delta$, 则 $j = -1 +$

$\frac{\delta_\omega L}{\delta_\omega R_2 + \omega \Delta} < 0$ 。当 O' 点在 DSF_1 和 DSF_2 的上同侧或下同侧时, 若转速平稳, $j = 1$; 若转速不平稳且 $\delta_\omega R_x < \omega' \Delta$, 则 $j = 1 + \frac{\delta_\omega L}{\delta_\omega R_2 - \omega \Delta} > 0$ 。

因此, 当转速比较平稳或转速相对变化量 $\delta_\omega / \omega' < \Delta / R_x$ 时, 沿径向平移 DDSFS, 并用平移前后的中心频率计算系数 j , 由 j 值的符号、 f_1 与 f_2 的相对大小可判定旋转中心成像点的位置区域。旋转中心成像点的位置区域与 j 值符号的关系如表 1 所示。 $j < 0$ 表明 O' 点在 DSF_1 和 DSF_2 之间, $j > 0$ 且 $f_1 > f_2$ 表示 O' 点在 DSF_1 和 DSF_2 的下同侧, $j > 0$ 且 $f_1 < f_2$ 说明 O' 点在 DSF_1 和 DSF_2 的上同侧。

表 1 旋转中心的位置区域与系数 j 的关系

Tab. 1 Relations of rotational center location with coefficient j

Coefficient j	Relation between f_1 and f_2	Location of rotation center
$j < 0$	—	Between DSF_1 and DSF_2
$j > 0$	$f_1 > f_2$	Below both DSF_1 and DSF_2
	$f_1 < f_2$	Above both DSF_1 and DSF_2

4 实 验

以平稳旋转的平面圆盘作为测量对象, 验证上述旋转中心定位法的准确性。被测旋转体端面的最大旋转半径为 90 mm, 即 $R_{\max} = 90$ mm, 其它参数为: $p = 2$ mm, $M = 1$, $L = 60$ mm, 转速 $\omega = 20$ rad/s。将旋转中心的成像点 O' 调整到 DSF_1 和 DSF_2 之间, 设定 O' 到 DSF_1 的距离 $R_1 = 3n$ mm, $n = 1, 2, \dots, 20$ 。待转速稳定后, 提取信号 I_1 和 I_2 的中心频率, 沿垂直于 DSF_1 的方向平移传感器, 平移量 Δ 满足 $0 < \Delta < \min(R_1, R_2)$, 再提取信号

I_1 和 I_2 的中心频率, 计算系数 j 。多次改变 R_1 和 Δ 并计算系数 j , 得到 j 随 R_1 和 Δ 的变化关系, 如图 5 所示。图中的 $j < 0$, 由此判定其旋转中心的像点在 DSF_1 与 DSF_2 之间。这与设定的旋转中心成像点位置是一致的。

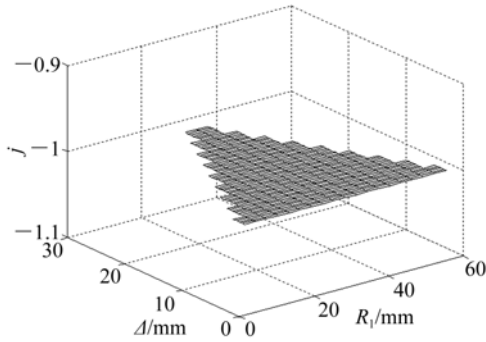
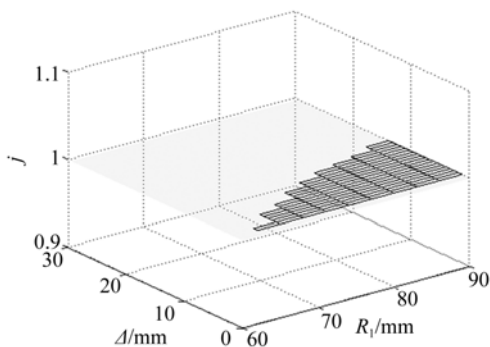
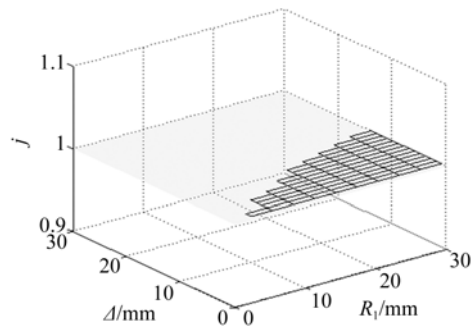


图 5 旋转中心成像点在 DSF_1 、 DSF_2 之间的 j 值
Fig. 5 Values of j in case of imaged rotation center between DSF_1 and DSF_2

同理, 将旋转中心的成像点 O' 调整到 DSF_1 和 DSF_2 的同侧(含上同侧和下同侧), O' 到 DSF_1 的距离为 R_1 。待转速稳定后, 获取 I_1 和 I_2 的中心频率, 沿垂直于 DSF_1 的方向平移传感器, 平移量 Δ 满足 $0 < \Delta < \min(R_1, R_2)$, 再提取信号 I_1 和 I_2 的中心频率, 计算系数 j 。多次改变 R_1 和 Δ 值并计算系数 j , 得到 j 随 R_1 和 Δ 的变化关系。当 O' 点在下同侧时, $L < R_1 < R_{\max}$, $R_2 = R_1 - L$, j 随 R 和 Δ 的变化关系如图 6(a) 所示; 当 O' 点在上同侧时, $0 < R_1 < R_{\max} - L$, $R_2 = R_1 + L$, j 随 R_1 和 Δ 的变化关系如图 6(b) 所示。



(a) O' 点在 DDSFS 的下同侧时
(a) In case of O' point below DDSFS



(b) 点 O' 在 DDSFS 的上同侧时
(b) In case of O' point above DDSFS

图 6 旋转中心成像点与 DDSFS 同侧时的 j 值
Fig. 6 Values of j in case of imaged point of rotation center at the same side of DDSFS

从图 6(a)、6(b) 可知: $j > 0$, 由此判定旋转中心成像点在 DSF_1 和 DSF_2 的同侧; 在图 6(a) 中总有 $f_1 > f_2$, 旋转中心像点在 DSF_1 与 DSF_2 的下同侧; 在图 6(b) 中总有 $f_1 < f_2$, 旋转中心像点在 DSF_1 与 DSF_2 的上同侧。实验结果与设定的旋转中心位置是一致的。

5 结 论

本文根据 DDSFS 遥测转速的原理, 提出了一种基于 DDSFS 的旋转中心位置辨识方法, 用于空间滤波转速遥测中转速值的计算和旋转方向的判定。该方法用 DDSFS 移动前后的两组中心频率计算出系数 j , 根据 j 的符号、中心频率 f_1 与 f_2 的相对大小来确定旋转中心的位置区域。结果表明, 系数 $j < 0$ 时, 旋转中心像点在 DSF_1 与 DSF_2 之间; $j > 0$ 且 $f_1 > f_2$ 时, 旋转中心像点在 DDSF 的下同侧; $j > 0$ 且 $f_1 < f_2$ 时, 旋转中心像点在 DDSF 的上同侧。该方法在转速相对平稳时能有效地辨识旋转中心的位置区域, 不需测量旋转半径, 对轴向和径向晃动、安装偏心、光学系统放大倍数的波动等均不敏感, 具有简单准确、遥测距离远的优点, 在固体旋转中心、固液气多相流(含粉尘)涡旋中心等远距离定位中具有很好的实用价值。

参考文献:

- [1] XU C L, LI J, WANG S M. A spatial filtering velocimeter for solid particle velocity measurement based on linear electrostatic sensor array[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2012, 26(15): 68-78.
- [2] 单泉源,张军勇,张艳丽,等.高功率激光系统空间滤波的离焦容限分析[J].*中国激光*,2012,39(9): 25-31.
SHAN Q Y, ZHANG J Y, ZHANG Y L *et al.*. Analysis of defocusing tolerance of spatial filtering in high power laser systems[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(9): 25-31. (in Chinese)
- [3] PAU S, DALLAS W J. Generalized spatial filtering velocimetry and accelerometry for uniform and non-uniform objects [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(24): 4713-4722.
- [4] HOSOKAWA S, MATSUMOTO T, TOMIYAMA A. Measurement of bubble velocity using spatial filter velocimetry[J]. *Experiments in Fluids*, 2013, 54(6): 1-12.
- [5] MARTI S, NILS D. *Velocity measurement for moving surfaces by using spatial filtering technique based on array detectors*[M]. Berlin:Springer Berlin Heidelberg Press, 2011, 6752: 303-310.
- [6] HOSOKAWA S, TOMIYAMA A. Spatial filter velocimetry based on time-series particle images [J]. *Experiments in Fluids*, 2012, 52(6): 1361-1372.
- [7] 王洋,颜昌翔,胡春晖,等.非接触式扫描反射镜转角测量系统[J].*光学精密工程*,2014,22(4): 850-855.
WANG Y, YAN CH X, HU CH H, *et al.*. Non-contact rotation angle measurement system for scanning mirrors [J]. *Opt. Precision Eng.* 2014, 22(4): 850-855. (in Chinese)
- [8] 吴俊,丁柱奇,余葵,等.光电非接触式表面流速测量[J].*光学精密工程*,2010,18(2): 349-356.
WU J, DING SH Q, YU K, *et al.*. Non-contact measurement of surface flow velocity using photoelectric method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2): 349-356. (in Chinese)
- [9] 刘红娜.基于 Android 系统的非接触式转速测量的研究与实现[D]. 秦皇岛:燕山大学,2013.
LIU H N. *Android-based Non-contact Speed Measurement Research and Implementation* [D]. Qinghuangdao:Yanshan University, 2013. (in Chinese)
- [10] 蒋善超,隋青美,王静,等.流速/温度共采的光纤布拉格光栅涡轮流速传感器[J].*光学精密工程*, 2014,22(10): 2611-2616.
JIANG SH CH, SUI Q M, WANG J, *et al.*. FBG turbine flow rate sensor for acquiring flow rate and temperature simultaneously [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(10): 2611-2616. (in Chinese)
- [11] HOSOKAWA S, MATSUMOTO T, TOMIYAMA A. Tomographic spatial filter velocimetry for three-dimensional measurement of fluid velocity[J]. *Experiments in Fluids*, 2013, 54(9): 1-12.
- [12] ATOR K T. Image-velocity sensing with parallel-slit reticles[J]. *JOSA*, 1963, 53(12): 1416-1419.
- [13] HE X, NIE X, ZHOU J, *et al.*. Velocity measurement for moving surfaces using spatial filtering method based on area image sensor[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2014. 125(24): 7136-7139.
- [14] 郑丽娜,张涛,匡海鹏,等.基于线阵 CCD 空间滤波效应的航空相机像移速度测量方法[J].*光学学报*, 2012,32(11): 109-115.
ZHENG L N, ZHANG T, KUANG H P, *et al.*. Image motion velocity measurement technique based on spatial filtering effect of line CCD for aerial camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 109-115. (in Chinese)
- [15] 郑丽娜,匡海鹏,李文明,等.基于线阵 CCD 的空间滤波测速信号基频消除方法[J].*光学学报*,2014, 34(2): 86-91.
ZHENG L N, KUANG H P, LI W M, *et al.*. Method of pedestal component elimination based on line CCD for spatial-filter velocimetry signal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 86-91. (in Chinese)

作者简介:



曾祥楷(1965—),男,四川开江人,教授,硕士生导师,1988年、1991年、1999年于重庆大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事波导、光纤光学、光电测量、光纤传感器与通信等方面的研究。E-mail: zxkai@cqut.edu.cn



朱志雄(1990—),男,湖北黄冈人,硕士研究生,2013年于重庆文理学院获得学士学位,主要从事光电信息获取与处理方面的研究。E-mail: 746274090@qq.com

(版权所有 未经许可 不得转载)